第39卷 第6期
2022年11月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

基于氢氧稳定同位素特征的潜水蒸发影响程度研究

蒋 磊[1,2]， 赵 毅[1]， 张鹏伟[1]， 何 亮[1]， 摆 翔[1]

（1. 中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心，新疆 乌鲁木齐 830057；
2. 中国地质大学（武汉）环境学院，湖北 武汉 430078）

摘 要： 干旱绿洲区在新疆发挥着重要的生态保护与水源涵养功能，区内的地下水不仅提供了宝贵的淡水资源，更是植物水分的主要来源。开展潜水蒸发影响程度研究，对分析干旱绿洲区土壤水分运移，土壤水与地下水转化关系、植物水分利用等方面都具有十分重要的意义。本文采用环境同位素、土壤物理和化学分析方法研究了新疆塔里木河下游干旱绿洲区胡杨（*Populus euphratica*）、柽柳（*Tamarix ramosissima*）等典型植被生长区的土壤剖面特征。结果表明：塔里木河下游干旱绿洲区具有强烈的潜水蒸发和毛细作用，对土壤水氢氧稳定同位素的分馏、土壤含水率、土壤含盐量的分布具有较大影响；自潜水面向上，随着高度增加，土壤水的氢氧稳定同位素值逐渐减小，并在1~1.5 m处达到最小值后又逐渐增大；土壤含水率逐渐减小，至1~1.5 m处土壤含水率减小的速率减缓；土壤含盐量在潜水面附近总体保持稳定，至1~1.5 m处含盐量逐渐开始增大；综合不同植被生长区土壤剖面数据，反映出该区秋季潜水蒸发影响深度为1~1.5 m。利用氢氧稳定同位素的分馏特征来研究干旱绿洲区潜水毛细高度及蒸发深度，可以获得传统水文地质和潜水蒸发实验无法得到的信息。

关键词： 毛细高度；潜水蒸发深度；氢氧稳定同位素；干旱绿洲区；新疆

新疆塔里木河下游的干旱绿洲区地处天山南麓，塔里木盆地东北缘，深居欧亚大陆腹地，远离海洋，属于典型的大陆性干旱气候区，区内蒸发强烈，降雨稀少，绿洲区生态脆弱，水资源是其经济发展和生态环境建设最主要的制约因素[1]。强烈的大气蒸发是驱动土壤水分向上运动的主要动力[2]，而对于潜水来说，耗散又主要是通过毛细作用向上供给土壤蒸发[3]。

关于氢氧稳定同位素在潜水蒸发规律研究中的应用，始于20世纪60年代，主要经历了饱和土壤稳态蒸发，非饱和土壤恒温和非恒温稳态蒸发，以及非饱和土壤非稳态蒸发条件下氢氧稳定同位素运动研究[4-7]。研究认为，潜水以及土壤水分运移与地下水埋深、TDS密切相关，同时还受到大气蒸发量、地表覆盖度、包气带结构、微地貌等因素的影响[8-10]；当土壤含水率大于绿洲区土壤持水度时，土壤水将通过毛细作用持续供给土壤蒸发，反之，土壤蒸发量将随着土壤含水率的降低而减小，当土壤含水率降低至毛管断裂含水率后，水分运移只能通过分子扩散进行[11]；其影响深度主要采用现场试验、室内试验测定或者通过海森公式进行计算，也取得了丰硕的成果[12-15]。由于毛细带中的水可以看作饱和或者接近饱和，毛细带也可看作是饱水带的上界[16]，并且土壤孔隙中毛细水所受的吸力小于植物根系吸力，毛细带也是植物吸收、利用水分的关键带[17-18]，目前，对于新疆干旱绿洲区包气带垂向深度上土壤水氢氧稳定同位素、土壤含水率、含盐量等参数的对比及规律研究报道的较少。所以，研究新疆干旱绿洲区影响土壤毛细水上升，尤其是潜水毛细作用和蒸发机理及其影响范围的判定，在分析土壤水分运移，土壤水与地下水转化关系、植物水分等方面都具有十分重要的意义。

本文采用精细开挖土壤垂向剖面方式，研究了干旱绿洲区胡杨（*Populus euphratica*）、柽柳（*Tamarix ramosissima*）等典型植被生长区的包气带结构和植物根系分布情况，开展了剖面中土壤含水率、土

收稿日期： 2022-03-12； **修订日期：** 2022-07-25
基金项目： 中国地质调查局南疆地区盐渍化区（巴州）生态地质调查二级项目（DD20191026）
作者简介： 蒋磊（1987-），男，硕士，高级工程师，主要从事水文地质方面的工作. E-mail: jl394465421@foxmail.com
通讯作者： 赵毅. E-mail: 01305235@163.com

壤含盐量以及地下水、土壤水、植物水的氢氧稳定同位素等项目的测试，并对垂向分布曲线数据进行了研究和分析，揭示了该区秋季潜水蒸发影响深度和土壤水运移规律，以期为塔里木河下游干旱绿洲区的水资源合理开发利用和生态环境保护修复提供科学依据。

1 研究区概况

新疆塔里木河下游的干旱绿洲区位于塔里木盆地的东北部（图1），塔克拉玛干沙漠和库姆塔格沙漠之间（86°34′~88°00′E，40°30′~41°05′N），北倚孔雀河，南濒塔里木河，地势平坦，海拔大部分在855 m以下，地势西高东低，南高北低，主要由河流冲积平原以及大片沙漠和风蚀地组成。该区属于典型的荒漠干旱气候，日照丰富，年平均气温10.8 ℃，年平均降水量34.7 mm，年均蒸发量达到2408.6 mm。除少数有灌溉条件的地区人工栽培植被代替了自然植被，其余绝大部分是尚未开垦的盐碱沙荒地，仍然保持着自然植被的生长[19]。该区域是南疆兵团重要的人口聚集地，也是全国优质棉花的主产区，发挥着生态保护与水源涵养的重要功能，地理区位十分重要[20]。由于该地区的水资源尤其是地下水，不仅提供宝贵的淡水资源，更是植物水分的主要来源，因此影响着当地的生态、生产和生活。

本文选择区内长势中等-较好的柽柳和胡杨生长区作为研究对象，其总盖度分别为25.38%和35.79%，采样点位分布见图1。由于研究区内分布较多的古河道和牛轭湖，沉积环境的分异使得区内包气带岩性主要为细砂、中细砂和粉质黏土，易于土壤水和潜水的蒸发。

2 研究方法

2020年10月初，主要采用人工土钻和垂向剖面开挖方式揭露包气带结构和植物根系分布情况。为避免长期暴露空气产生的误差，剖面开挖选择清晨时间段，直到露出潜水位为止，并获得2个连续、完整的非饱和带土壤剖面。剖面规格分别为：长2.2 m、宽1.8 m、深2.15 m，长2.2 m、宽2.6 m、深2.85 m，在剖面上以每20 cm刻槽采集1个土壤样，分析测试土壤含水率、土壤含盐量；同时兼顾土壤质地尽可能采集土壤水同位素样品，期间取回植物木质部水分同位素样品。

2.1 土壤含水率测试

采用环刀采集大于100 g的原状土，装入铝盒后现场用0.01 g精度的电子天平称出湿土重量后，带回实验室，采用土壤烘干箱在110 ℃的条件下烘12 h，再次称干土重量，土壤含水率（W）通过下式来

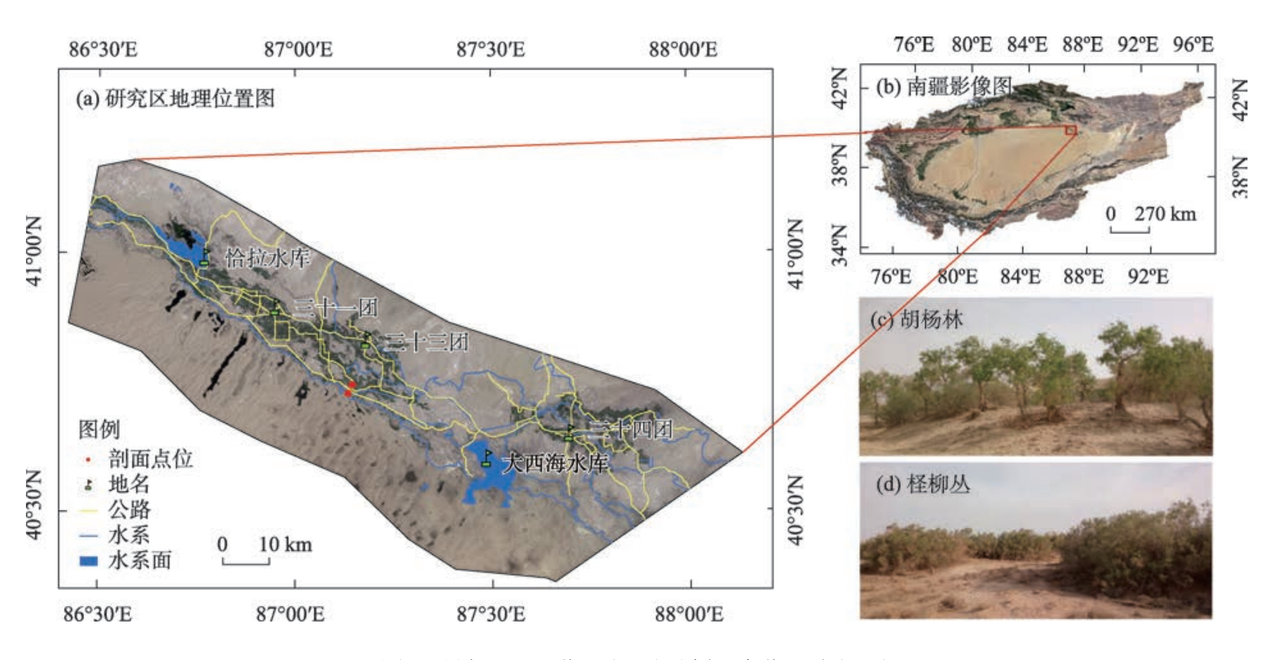


图1 研究区地理位置（a~b）及剖面点位照片（c~d）

Fig. 1 Geographical location of the study area (a-b) and photos of sampling profile points (c-d)

计算：

$$W=(W_1-W_2)/(W_2-W_0)\times100\%$$

式中：W为土壤含水率(%)；W_0盒重(g)；W_1湿土加盒重(g)；W_2干土加盒重(g)

2.2　土壤水、植物水抽提

将现场采集的分层土壤样品以及植物样品迅速装入密封袋，再放入装有冰块的恒温箱内带回实验室。植物同位素水样品提取采用低温真空蒸馏法，土壤水分提取采用全自动真空冷凝抽提系统。

2.3　土壤水、植物水及地下水氢氧稳定同位素测试

土壤水、植物水及地下水样品的氢氧稳定同位素测定由中国地质调查局西安中心干旱半干旱区地下水与生态重点实验室完成，测定仪器为液态水同位素激光测试仪(LWIA)，δD、δ^{18}O值的分析精度分别可以达到0.5‰和0.10‰。所有水样中的氢氧稳定同位素含量用VSMOW的千分差δ表示。

2.4　土壤易溶盐测试

采用帆布袋现场采集分层土壤易溶盐样，用保鲜袋封好放入装有冰块的恒温箱。测试时称取20 g土壤样品放在装有100 mL去离子水的聚乙烯塑料瓶中，剧烈震荡20 min后静置2 h以上；移取20 mL上层溶液，直接测定pH值；将剩余上层溶液用10000 r·min^{-1}离心机离心30 min得到澄清液，随后进行阴阳离子测定，CO_3^{2-}、HCO_3^-测定含量采用滴定法(VOL)；Cl^-、CO_4^{2-}测定含量采用离子色谱法(ICS)；K^+、Na^+、Ca^{2+}和Mg^{2+}含量测定采用电感耦合等离子体光谱法(ICP-AES)。

3　结果与分析

3.1　土壤剖面包气带结构及植物根系分布

由图2可知，柽柳剖面包气带结构自上而下分别为：中细砂、细砂、粉砂、细砂、粉质黏土、细砂，厚度8~120 cm；剖面内柽柳根系呈鱼尾形状，主要由细根(d≤2 mm)、中根(2 mm<d≤5 mm)和粗根(d>5 mm)组成，根系延伸较长，说明柽柳根系的趋水性促使根系拓展到更远的地方，并且根系的生物量随着剖面深度增加而减少，说明柽柳主要吸收利用浅层土壤水和养分。胡杨剖面(图3)包气带结构自上而下分别为：细砂、粉砂、黏土质粉砂互层；剖面内胡杨根系分布具有不对称性，主要由细根(d≤2 mm)、中根(2 mm<d≤10 mm)、粗根(10 mm<d≤50 mm)和

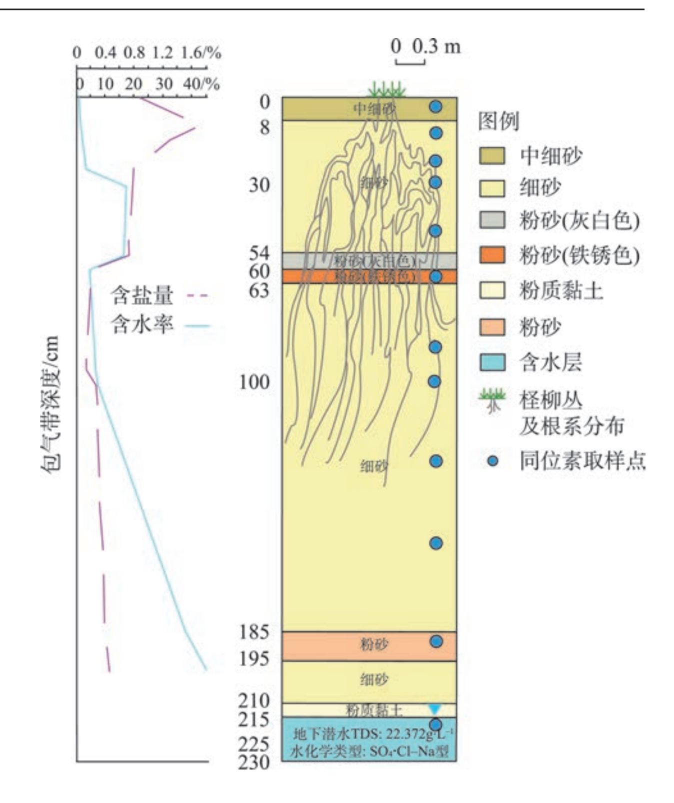


图2　柽柳剖面包气带结构及含水率、含盐量分布

Fig. 2　Structure of the vadose zone and the distribution of water content and salinity in the vertical section of *Tamarix ramosissima*

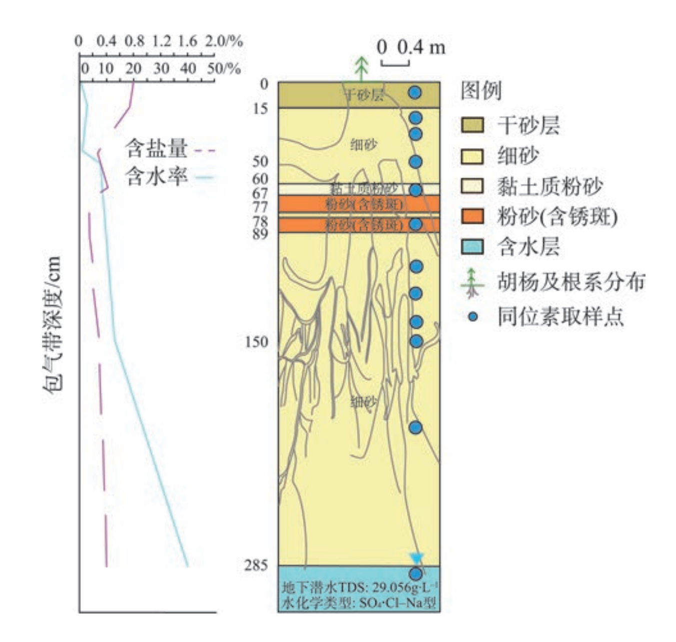


图3　胡杨剖面包气带结构及含水率、含盐量分布

Fig. 3　Structure of the vadose zone and the distribution of water content and salinity in the vertical section of *Populus euphratica*

粗大根(d>50 mm)组成，且横向根系发达空间延展能力强，说明胡杨根系通过水平延展寻找所需的营

养和水分，还有部分死根主要集中在地表1 m以内、距离树基1.5 m以外，说明死根的分布与水分的分布情况有很大的关系，且绝大部分死根为细根，说明细根的新陈代谢最为活跃。

3.2 土壤剖面含水率及含盐量

从垂向分布情况来看，由地表向潜水面土壤剖面含水率总体呈增加的趋势，但由于包气带岩性结构、地表覆盖度等条件的限制，不同深度包气带含盐量的变化规律不尽相同。柽柳剖面（图2）显示，随着深度的增加，土壤含水率逐渐升高，由于粉砂夹层的影响，30~50 cm处土壤含水率较高，为20%，随后含水率降低、变化速率减缓，至100 cm处变化速率增大，含水率逐渐增高至潜水面。胡杨剖面（图3）也同样显示，随着深度的增加，土壤含水率逐渐升高，由于黏土层的影响，50 cm处土壤含水率较高，为10%，随后含水率变化速率减小，至150 cm处变化速率增大，含水率也逐渐升高至潜水面。

随着深度的增加土壤剖面含盐量总的变化趋势表现为降低，但由于地形地貌、水文地质等条件的不同，不同深度包气带含盐量的变化规律也不一致，包气带浅部含盐量随深度增加出现明显变化，达到某一深度，则含盐量趋于一定值。柽柳剖面（图2）显示，随着深度的增加，土壤含盐量先是逐渐升高，近地表8 cm处土壤含盐量最高，为1.5%，随后土壤含盐量降低、变化速率增大，至100 cm处趋于稳定。胡杨剖面（图3）显示，随着深度的增加，土壤含盐量逐渐降低，表层土壤含盐量最高，为0.8%，随后含盐量变化速率减缓，至150 cm处变化趋于稳定。

3.3 土壤水氢氧稳定同位素垂向分布

由图4可知，柽柳剖面土壤水氢氧稳定同位素呈现如下规律：土壤水氢氧稳定同位素值随着包气带深度增大而逐渐减小，并趋于稳定，稳定时土壤水氢氧稳定同位素值接近潜水值；潜水氢氧稳定同位素值普遍低于土壤水，二者又小于雨水，相对土壤水来说，地下水的更新速率高于土壤水，使地下水氢氧稳定同位素被稀释；从潜水面至地表，土壤水氢氧稳定同位素值先减小至最小值，约地下1 m处，随后逐渐增大至最大值，约地下30 cm处，至剖面表层时值极低。

胡杨剖面（图5）土壤水氢氧稳定同位素呈现如下规律：土壤水氢氧稳定同位素值随着包气带深度增大而逐渐减小，并趋于接近潜水值；潜水氢氧稳定同位素值普遍低于土壤水，二者又小于雨水；从潜水面至地表，土壤水氢氧稳定同位素值先是减小至最小值，约地下1.5 m处，随后逐渐增大至最大值，约地下50 cm处，至剖面表层时值极低。

4 讨 论

4.1 土壤水的补给来源

氢氧稳定同位素被称为水的“指纹”，因为其作为水分子的组成部分不同于一般溶质[21]。作为一种新的研究手段，可以在点和流域尺度上示踪水分运动。由于塔里木河下游的干旱绿洲区降水稀少，地表没有稳定径流，除了人工灌溉以外，土壤水的

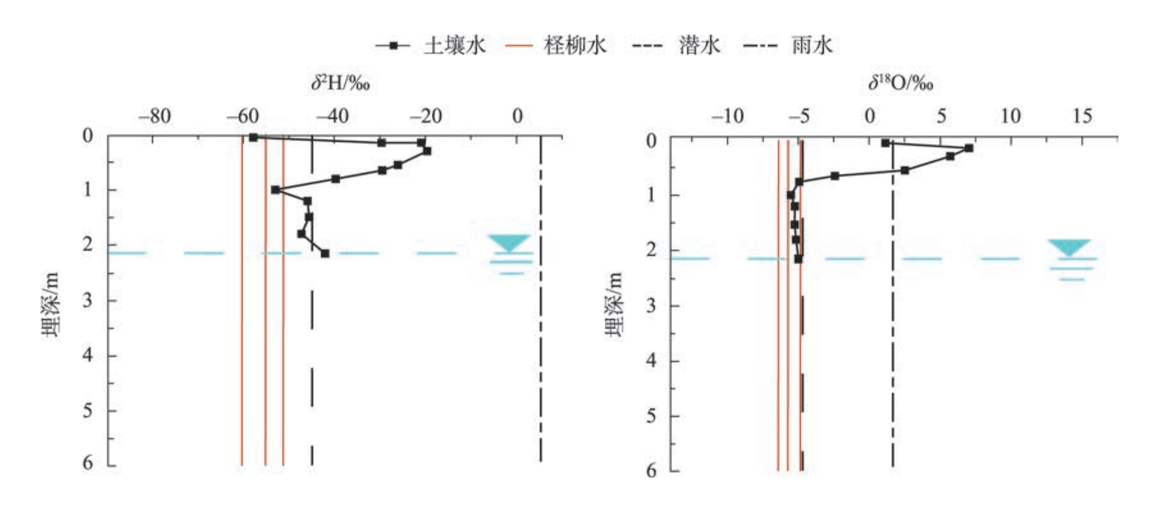


图4 柽柳剖面土壤水氢氧稳定同位素特征（2020年10月）

Fig. 4 Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of soil water in the vertical section of *Tamarix ramosissima* (2020.10)

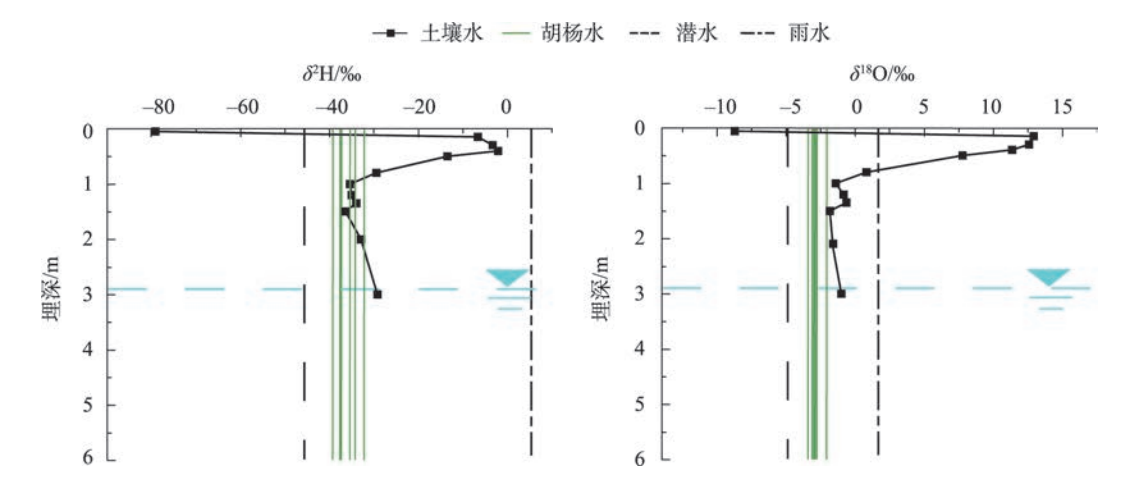


图5　胡杨剖面土壤水氢氧稳定同位素特征(2020年10月)

Fig. 5　Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of soil water in the vertical section of *Populus euphratica* (2020.10)

来源有大气降水和地下水。从2个不同植被剖面的土壤水氢氧稳定同位素垂向分布情况来看,土壤水中的δ^2H、δ^{18}O值均要比潜水中的δ^2H、δ^{18}O值更加富集,并且二者明显小于雨水,说明土壤水并非来自大气降水,而是由潜水补给后,在包气带中受到强烈毛细作用和蒸发作用并向上运移,逐渐与包气带中的水混合,并在浅表层受到分馏作用后不断富集。至于表层出现极低值,可能是由于干旱绿洲区早晚温差大,清晨采样时,部分空气凝结水使得浅层土壤水氢氧稳定同位素贫化[22],故氢氧稳定同位素数值极低。

4.2　植物用水的来源

通过比较植物木质部水分与潜在水源的氢氧稳定同位素组成,可以初步判断出不同样地的植物茎部水同位素的来源,即如果存在交点,那么该交点对应的水源即为植物的主要水分来源[23],该方法只能定性判断植物用水而不能量化植物水分的利用率。从柽柳水氢氧稳定同位素分布来看,δ^2H值的变化范围为-60‰~-50‰,小于潜水和雨水δ^2H值,与土壤水在1.0 m附近有交叉点;δ^{18}O值的变化范围为-7‰~-5‰,与δ^2H值相似均小于潜水和雨水δ^{18}O值,与土壤水在1.0 m附近有交叉点,由于δ^{18}O在植物吸收过程中更加稳定、不易发生分馏,故说明柽柳可能主要吸收1.0 m附近的包气带水。从胡杨水氢氧稳定同位素分布来看,δ^2H值的变化范围为-50‰~-32‰,δ^{18}O值的变化范围为-3‰~-2‰,小于雨水δ^2H、δ^{18}O值,但大于潜水δ^2H、δ^{18}O值,与土壤水在0.8~2.5 m附近有交叉点,说明胡杨可能主要吸收深度介于0.8~2.5 m附近的包气带水以及潜水。

4.3　潜水蒸发的影响程度

根据物理分馏原理,从潜水面向上,随着毛细作用减小,氢氧稳定同位素逐渐被稀释并达到一定高度,即毛细高度;由于吸附与解吸引起的分子扩散过程中,分子的扩散速度与分子的质量平方根成反比,因此轻同位素富集在扩散的前方,而重同位素将残留在扩散的后方。而地表向下,随着蒸发作用增强,氢氧稳定同位素逐渐被稀释并达到一定深度,即蒸发深度;由于蒸发与凝聚引起的分子扩散过程中,分子的扩散速度与分子的质量平方根成反比,因此轻同位素富集在蒸发面的浅部,而重同位素将残留在蒸发面的深部[24-25]。因此,根据图4土壤水氢氧稳定同位素分布,间接指示该点潜水毛细高度可达地下1 m埋深;蒸发作用发生在地下1 m埋深以上。根据图5土壤水氢氧稳定同位素分布,间接指示该点潜水毛细高度可达到地下1.5 m埋深;蒸发作用发生在地下1.5 m埋深以上。

与土壤剖面含水率、含盐量分布曲线也基本一致,根据图2显示,从潜水面向地表,土壤剖面含水率逐渐减小至1 m位置处,随后含水率减小的速率减缓,地表含水率达到最低;土壤剖面含盐量在潜水面附近总体保持稳定,至100 cm处含盐量出现跳跃并逐渐增大,近地表附近土壤含盐量达到最高。图3也同样显示,从潜水面向地表,土壤剖面含水率逐渐减小至1.5 m位置处,随后含水率减小的速率减缓,地表含水率达到最低;土壤剖面含盐量在潜水面附近总体保持稳定,至150 cm处含盐量逐渐开

始增大，表层土壤含盐量达到最高；总体反映出该区强烈的潜水蒸发和毛细作用。

5 结 论

（1）在新疆干旱绿洲区，强烈的大气蒸发和土壤毛细作用是驱动包气带内土壤水分向上运移的主要动力，区内的潜水不仅提供了丰富的土壤水，更是植物水分的主要来源。

（2）自潜水面向上，从土壤剖面中土壤水的氢氧稳定同位素垂向分布来看，随着高度增加，其值逐渐减小，并在1~1.5 m处达到最小值后又逐渐增大；土壤剖面中土壤含水率逐渐减小，随后至1~1.5 m处含水率减小的速率减缓；土壤剖面含盐量在潜水面附近总体保持稳定，至1~1.5 m处含盐量逐渐开始增大。

（3）综合土壤剖面中土壤水的氢氧稳定同位素、土壤含水率、土壤含盐量分布，反映出塔里木河下游的干旱绿洲区强烈的潜水蒸发和毛细作用，由于水分运移对氢氧稳定同位素的物理分馏影响较大，间接指示该区秋季潜水蒸发作用可能影响的深度为1~1.5 m。

致谢：衷心感谢长安大学杨泽元老师、徐中华老师在野外工作中的指导和中国地质大学（武汉）胡顺老师在图件制作中的帮助。

参考文献（References）：

[1] 刘秀强, 陈喜, 刘琴, 等. 西北干旱区尾闾湖过渡带陆面蒸发和潜水对土壤水影响的同位素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(6): 52–59. [Liu Xiuqiang, Chen Xi, Liu Qin, et al. Variation of hydrogen and oxygen isotopes in soil water and soil water evaporation depth around terminal lake in arid region of Northwest China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(6): 52–59.]

[2] 周燕怡, 王旭升. 巴丹吉林沙漠潜水蒸发的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 44–54. [Zhou Yanyi, Wang Xusheng. Numerical simulation of groundwater evaporation in the Badain Jaran Desert of China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 44–54.]

[3] 马稚桐, 王文科, 赵明, 等. 半干旱地区地表—地下水系统水热运移与裸土蒸发研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 7–14. [Ma Zhitong, Wang Wenke, Zhao Ming, et al. Hydrothermal transfer and bare soil evaporation in surfacegroundwater systems in semi-arid areas[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(4): 7–14.]

[4] 周龙, 杨鹏年, 王永鹏, 等. 塔里木河下游河段耗水特征与输水方式演变研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 144–154. [Zhou Long, Yang Pengnian, Wang Yongpeng, et al. Characteristics of water consumption and the evolution of water delivery methods in the lower reach of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 144–154.]

[5] 王登, 霍思远, 孙芳, 等. 人工溴示踪法评价潜水蒸发可行性数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 19–27. [Wang Deng, Huo Siyuan, Sun Fang, et al. Numerical simulation on applicability of bromide tracer method for evaluating groundwater evaporation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 19–27.]

[6] 邓改革, 何建国, 康宁波. 基于多物理场耦合的毛细水高度研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 136–141. [Deng Gaige, He Jianguo, Kang Ningbo. Research on capillary water height based on multi-physical field coupling[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 136–141.]

[7] Zhang Fuchu, Wu Bin, Gao Fan, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater and evaluation of water quality in arid area of Northwest China: A case study in the plain area of Kuitun River Basin[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14: 2099.

[8] 徐永亮, 于静洁, 张一驰, 等. 生态输水期间额济纳绿洲区地下水动态数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(4): 11–18. [Xu Yongliang, Yu Jingjie, Zhang Yichi, et al. Groundwater dynamic numerical simulation in the Ejina Oasis in an ecological water conveyance period[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(4): 11–18.]

[9] 赵明, 郭志中, 王耀琳, 等. 不同地下水位植物蒸腾耗水特性研究[J]. 干旱区研究, 2003, 20(4): 286–291. [Zhao Ming, Guo Zhizhong, Wang Yaolin, et al. Study on the transpiration characteristics of 10 species of plants under the different depths of groundwater level[J]. Arid Zone Research, 2003, 20(4): 286–291.]

[10] 孙芳强, 尹立河, 马洪云, 等. 准噶尔盆地南缘土壤水运移特征及其补给来源识别[J]. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1271– 1277. [Sun Fangqiang, Yin Lihe, Ma Hongyun, et al. Identification of soil water migration and recharge sources in the southern marginal zone of the Junggar Basin, China[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(6): 1271–1277.]

[11] 张平, 吴昊, 殷洪建, 等. 土层结构对毛细水上升高度和地下水蒸发影响的研究[J]. 节水灌溉, 2011, 36(3): 6–8. [Zhang Ping, Wu Hao, Yin Hongjian, et al. Research on influence of construction of soil layer on height of capillary water upward movement and evaporation of groundwater[J]. Water Saving Irrigation, 2011, 36(3): 6–8.]

[12] 孙英, 周金龙, 齐子萱, 等. 日尺度和小时尺度下干旱区潜水蒸发变化特征及成因[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(增刊2): 14–19. [Sun Ying, Zhou Jinlong, Qi Zixuan, et al. Variation characteris-

tics and causes of phreatic water evaporation in arid area on daily and hourly scales[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39 (Suppl.2): 14-19.]

[13] Aderonke O Adegbule, Tohren C G Kibbey. Exploring the impact of long- term evaporation on the relationship between capillary pressure and water saturation in unsaturated porous media[J]. Journal of Hydrology, 2020, 582: 124557.

[14] Xiong Lvyang, Xu Xu, Ren Dongyang, et al. Enhancing the capability of hydrological models to simulate the regional agro-hydrological processes in watersheds with shallow groundwater: Based on the SWAT framework[J]. Journal of Hydrology, 2019, 572: 1-16.

[15] 孙海燕, 叶含春, 许丽, 等. 沙漠绿洲区平原水库下缘盐荒地水盐动态规律[J]. 干旱区研究, 2017, 34(5): 967-971. [Sun Haiyan, Ye Hanchun, Xu Li, et al. Water and salt migration under saline wasteland in a desert-oasis area at the lower edge of a plain reservoir[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(5): 967-971.]

[16] Chen Hang, Liu Zhongyi, Huo Zailin, et al. Impacts of agricultural water saving practice on regional groundwater and water consumption in an arid region with shallow groundwater[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 1204.

[17] Chen Li, Wang Wenke, Zhang Zaiyong, et al. Estimation of bare soil evaporation for different depths of water table in the wind-blown sand area of the Ordos Basin, China[J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26: 1693-1704.

[18] 余绍文, 孙自永, 周爱国, 等. 用D-O同位素确定黑河中游戈壁地区植物水分来源[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 717-723. [Yu Shaowen, Sun Ziyong, Zhou Aiguo, et al. Determination of water sources of gobi plant by D and ^{18}O stable iIsotopes in middle reaches of the Heihe River[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(3): 717-723.]

[19] 周海, 郑新军, 唐立松, 等. 盐生荒漠土壤水稳定氢、氧同位素组成季节动态[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 162-169. [Zhou Hai, Zheng Xinjun, Tang Lisong, et al. Analysis on seasonal dynamics of δ^{18}O and δD in soil water at a saline desert site in the southeastern Junggar Basin[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 162-169.]

[20] 李均力, 肖昊, 沈占锋, 等. 2013—2018年塔里木河下游植被动态变化及其对生态输水的响应[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 985-992. [Li Junli, Xiao Hao, Shen Zhanfeng, et al. Vegetation changes during the 2013-2018 period and its response to ecological water transport in the lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 985-992.]

[21] 马斌, 梁杏, 林丹, 等. 应用^{2}H、^{18}O同位素示踪华北平原石家庄包气带土壤水入渗补给及年补给量确定[J]. 地质科技情报, 2014, 33(3): 163-174. [Ma Bin, Liang Xing, Lin Dan, et al. Tracing infiltration and recharge of the unsaturated zone using ^{2}H,^{18}O isotopes in Shijiazhuang,North China Plain[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(3): 163-174.]

[22] 张文佳, 王乃昂, 于昕冉, 等. 基于地下水动态和经验模型的巴丹吉林沙漠潜水蒸发量级——以苏木吉林湖区为例[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1215-1222. [Zhang Wenjia, Wang Nai'ang, Yu Xinran, et al. Magnitude of groundwater evapotranspiration in the Badain Jaran Desert based on groundwater dynamics method and empirical model: A case study of the Sumujilin Lake Area[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1215-1222.]

[23] 于晓雯, 刘华民, 王立新, 等. 基于稳定同位素技术的黄河支流河岸植被水分来源解析[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 75-82. [Yu Xiaowen, Liu Huamin, Wang Lixin, et al. Analysis on water sources of riverback vegetation in tributary of Yellow River based on stable isotope technique[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 75-82.]

[24] 赵晓涵, 张方敏, 韩典辰, 等. 内蒙古半干旱区蒸散特征及归因分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1614-1623. [Zhao Xiaohan, Zhang Fangming, Han Dianchen, et al. Evapotranspiration changes and its attribution in semi-arid regions of Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1614-1623.]

[25] 肖红宇, 刘明寿, 彭鹏程, 等. 基于黏性土分形特征的毛细水上升高度研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 48-52. [Xiao Hongyu, Liu Mingshou, Peng Pengcheng, et al. A study of the height of capillary water rise based on fractal characteristics of cohesive soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 48-52.]

Study on influence degree of phreatic evaporation based on hydrogen and oxygen isotope characteristics

JIANG Lei[1,2], ZHAO Yi[1], ZHANG Pengwei[1], HE Liang[1], BAI Xiang[1]

(1. Urumqi Center of Natural Resources Comprehensive Survey, CGS, Urumqi 830057, Xinjiang, China;
2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430078, Hubei, China)

Abstract: The arid oasis area plays an important role in ecological protection and water conservation in Xinjiang. The groundwater in the area provides precious freshwater resources and is the main source of water for plants. It is important to study soil water transport, the relationship between soil water and groundwater transformation, and plant water in arid oasis areas, by studying the influencing degree of phreatic evaporation. To study the soil profile characteristics of typical vegetation growing areas, such as *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima*, in arid oasis area of the lower reaches of the Tarim River, environmental isotope, soil physical, and chemical analysis methods were used in this paper. The results showed that there are strong phreatic evapotranspiration and capillarity in the lower reaches of the Tarim River. It greatly influences the fractionation of hydrogen and oxygen isotopes, soil moisture content, and soil salinity. From the diving face up, as height increases, the stable isotope values of hydrogen and oxygen in soil water decreased gradually and reached a minimum value at 1−1.5 m and then gradually increased. Gradually, the soil moisture content decreases, and the rate of decrease slows down at 1−1.5 m. The soil salinity generally remains stable near the water table, and the salt content gradually increases at 1−1.5 m. Integrate soil profile data of different vegetation growing areas, the influence depth of phreatic evapotranspiration is 1−1.5 m in autumn. Using the fractionation characteristics of hydrogen and oxygen isotopes to study the phreatic capillary height and evaporation depth in arid oasis areas, it is possible to get the information that traditional hydrogeology and phreatic evaporation experiments cannot get. In the next step, it is necessary to summarize the water-salt transport law and its movement model under different evapotranspiration conditions.

Keywords: capillary height; influence depth of phreatic evaporation; hydrogen and oxygen isotopes; arid oasis area; Xinjiang